

文章编号:1674-2869(2019)05-0447-06

Ce³⁺, Tb³⁺, Yb³⁺三掺杂CaAl₂Si₂O₈下转换荧光粉的制备及其发光性能

周佳, 姚植彩, 戴武斌*, 黄珂, 胡金, 许硕, 徐慢
武汉工程大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430205

摘要:硅基太阳能电池作为目前技术最成熟、使用最广泛的光伏器件,其光电转换效率较低主要是由于太阳光谱与硅的最大吸收光谱不匹配造成的。为了解决这个问题并提升Yb³⁺的近红外光发射强度,采用高温固相法制备了CaAl₂Si₂O₈:Ce³⁺,Tb³⁺,Yb³⁺系列荧光粉,并通过X射线衍射(XRD)分析仪和荧光光谱仪分析了该荧光粉样品的晶体结构、最佳掺杂浓度及发光性能。XRD分析结果表明掺杂离子Ce³⁺,Tb³⁺,Yb³⁺均占据Ca²⁺格位,并且掺杂少量的稀土离子不会改变基质CaAl₂Si₂O₈(CASO)的晶体结构。荧光光谱分析表明由于在三掺杂荧光粉CaAl₂Si₂O₈:Ce³⁺,Tb³⁺,Yb³⁺中存在着Ce³⁺→Tb³⁺→Yb³⁺的合作能量传递过程,因此在近紫外光的激发下,相对于其它荧光粉,该三掺杂荧光粉中Yb³⁺的近红外光发射强度得到明显增强,并且最佳掺杂浓度的荧光粉化学式为Ca_{0.655}Al₂Si₂O₈:0.07Ce³⁺,0.10Tb³⁺,0.06Yb³⁺。该三掺杂荧光粉可以将硅基太阳能电池吸收较弱的紫外光转换为吸收较强的近红外光,从而实现光谱修饰,最终达到提高其光电转换效率的目的。

关键词:能量转移;发光性能;下转换荧光粉;硅基太阳能电池;CaAl₂Si₂O₈:Ce³⁺,Tb³⁺,Yb³⁺

中图分类号:O482.31 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2019.05.007

Preparation and Luminescent Properties of Ce³⁺/Tb³⁺/Yb³⁺ Tri-Doped CaAl₂Si₂O₈ Down-Conversion Phosphors

ZHOU Jia, YAO Zhicai, DAI Wubin*, HUANG Ke, HU Jin, XU Shuo, XU Man

School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: As the most mature and widely used photovoltaic device, silica-based solar cells' light-to-electric conversion efficiency was limited mainly due to the mismatch between the solar spectrum and the maximum absorption spectrum of silicon. To solve this problem and enhance the near-infrared emission intensity of Yb³⁺, a series of CaAl₂Si₂O₈:Ce³⁺,Tb³⁺,Yb³⁺ phosphors were prepared by high temperature solid state reaction. The crystal structure, optimum doping concentrations and luminescence properties of the phosphors samples were analyzed by an X-ray diffraction (XRD) and fluorescence spectroscopy. XRD results show that Ce³⁺, Tb³⁺ and Yb³⁺ all occupy the Ca²⁺ lattices without significant changes in the crystal structure of CaAl₂Si₂O₈. Fluorescence spectra indicate that the cooperative energy transfer process of Ce³⁺→Tb³⁺→Yb³⁺ in the tri-doped phosphors exists. Compared with other phosphors, the near-infrared demission intensity of Yb³⁺ for tri-doped phosphor CaAl₂Si₂O₈:Ce³⁺,Tb³⁺,Yb³⁺ is significantly enhanced via energy transfer from Ce³⁺→Tb³⁺→Yb³⁺ under the excitation of near ultraviolet light, and the best doping concentration of phosphor is Ca_{0.655}Al₂Si₂O₈:0.07Ce³⁺,0.10Tb³⁺,0.06Yb³⁺. The above results show that the tri-doped phosphor can convert the ultraviolet light weakly absorbed by the Si-based solar cells into near-infrared light with strong absorption, thereby realizing the spectral modification and finally achieving the purpose of improving the light-to-electric conversion efficiency.

Keywords: energy transfer; optical properties; down-conversion phosphor; Si-based solar cell; CaAl₂Si₂O₈:Ce³⁺, Tb³⁺, Yb³⁺

收稿日期:2019-03-25

基金项目:湖北省技术创新专项(2016ACA160);武汉工程大学博士启动基金(16QD28);武汉工程大学第九届研究生教育创新基金(CX2017013)

作者简介:周佳,硕士研究生。E-mail: jia.zhou@wit.edu.cn

***通讯作者:**戴武斌,博士,特聘教授。E-mail: wubin.dai@wit.edu.cn

引文格式:周佳,姚植彩,戴武斌,等. Ce³⁺, Tb³⁺, Yb³⁺三掺杂CaAl₂Si₂O₈下转换荧光粉的制备及其发光性能[J]. 武汉工程大学学报, 2019, 41(5): 447-452.

太阳能具有以下特点:1)取之不尽,用之不竭;2)不受地理位置影响;3)光伏发电技术较为成熟,因此相对其它能源,太阳能成为人类利用最广泛,最具有发展前途的绿色清洁能源^[1-2]。硅基太阳能电池作为目前主流的光电转换装置,其实际光电转换效率只有15%(小于Shockley-Queisser极限效率)左右,这主要是太阳光谱与硅的最大吸收光谱不匹配造成的^[3]。硅半导体具有特定的能带隙($\approx 1.12\text{ eV}$),低于能带隙的低能光子由于不能激活空穴-电子对而无法被吸收,高于能带隙的高能光子除了激发空穴-电子对外,剩下的能量会以热化效应损失掉,结果造成大量的能量损失,因此在很大程度上降低了硅基太阳能电池的光电转换效率^[4-7]。为了解决这个问题,近年来,可以将1个高能光子转换成2个或者多个低能光子的下转换荧光粉材料引起了人们的广泛关注,被认为是解决硅基太阳能电池高能光子能量损失的一种有效方法^[8-10]。

由于硅基太阳能电池的最大光谱响应位于近红外区域,研究发现 Yb^{3+} 离子基态 $^2\text{F}_{7/2}$ 与激发态 $^2\text{F}_{5/2}$ 的能隙差($\approx 10\,000\text{ cm}^{-1}=1\,000\text{ nm}$)与其十分接近,因此 Yb^{3+} 离子掺杂的下转换荧光粉材料常用于硅基太阳能电池中。然而, Yb^{3+} 离子4f-4f禁戒跃迁能级使其在近紫外区域吸收较弱,导致近红外发射强度也相对较低。为了克服上述缺点,在荧光粉中掺入敏化剂,通过能量转移的方式使 Yb^{3+} 离子的近红外发射强度得到增强。到目前为止,常用的敏化剂包括 Tb^{3+} , Pr^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} 等^[11-14]。通过能级图发现 Tb^{3+} 离子 $^7\text{F}_6\rightarrow^5\text{D}_4$ 的辐射跃迁能量为 Yb^{3+} 离子 $^2\text{F}_{7/2}\rightarrow^2\text{F}_{5/2}$ 的吸收跃迁能量的2倍,使得1个 Tb^{3+} 离子可以同时激发2个 Yb^{3+} 离子,因此目前研究主要集中在 $\text{Tb}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺杂荧光粉中。虽然 Tb^{3+} 离子通过敏化作用在一定程度上可以增强 Yb^{3+} 离子的近红外发射强度,但是其在近紫外和可见光区域吸收强度仍然较弱,导致 $\text{Tb}^{3+}\rightarrow\text{Yb}^{3+}$ 的能量传递效率较低,因此限制了其在硅基太阳能电池上的应用。考虑到 Ce^{3+} 离子不仅是一种高效的发光中心,而且是一种很好的敏化剂,属于4f \rightarrow 5d电偶极允许跃迁,其可以有效地敏化 $\text{Tb}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 离子的发光,大大提升在近紫外区域的吸收强度^[15-16]。因此在 Ce^{3+} , Tb^{3+} , Yb^{3+} 三掺杂荧光粉中可以实现 $\text{Ce}^{3+}\rightarrow\text{Tb}^{3+}\rightarrow\text{Yb}^{3+}$ 的逐级能量传递过程,相对于 Tb^{3+} , Yb^{3+} 双掺杂荧光粉, Yb^{3+} 离子的近红外发射强度得到进一步增强。

除了掺杂的稀土离子以外,基质材料的选择

也是影响荧光粉发光性能的关键因素^[17]。本文在以前研究^[18-21]基础上,继续采用碱土钙长石 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{CASO})$ 为基质材料,由于其骨架结构由一系列相互连接的角共享 SiO_4 和 AlO_4 四面体形成, Ca^{2+} 占据空腔位置从而形成三维网络结构,因此该基质荧光粉材料具有较好的热稳定性和化学稳定性。通过在CASO基质中掺杂稀土离子 Ce^{3+} , Tb^{3+} , Yb^{3+} ,制备出性能优异的三掺杂荧光粉材料,以研究该下转换荧光粉材料在硅基太阳能电池中的潜在应用价值。

1 实验部分

1.1 原料

CaCO_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , CeO_2 , Tb_4O_7 和 Yb_2O_3 , 均为分析纯。

1.2 样品制备

按照目标化学式 $\text{Ca}_{1-1.5(x+y+z)}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8:x\text{Ce}^{3+},y\text{Tb}^{3+},z\text{Yb}^{3+}$ 对应的化学计量比分别称取相应的原料置于玛瑙研钵中,研磨使其充分混合后转移到石英坩埚中,然后采用高温固相法,在 $1\,350\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温条件下,通入 $V(\text{N}_2):V(\text{H}_2)=19:1$ 的还原气体,煅烧50 h后自然冷却至室温,然后经过精细研磨后即可得到相应的荧光粉样品。

1.3 表征方法

采用X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析仪对样品进行物相分析;采用FLS920稳态/瞬态荧光光谱仪测量样品在近紫外和可见光区域的光致发光激发(photoluminescence excitation, PLE)谱和光致发光(photoluminescence, PL)谱;采用FLS980稳态/瞬态荧光光谱仪测量样品在近红外区域的发射光谱。

2 结果与讨论

2.1 晶体结构分析

图1(a)为实验制备的CASO基质、CASO:0.07 Ce^{3+} 、CASO:0.07 Ce^{3+} ,0.1 Tb^{3+} 及CASO:0.07 Ce^{3+} ,0.10 Tb^{3+} ,0.06 Yb^{3+} 荧光粉样品的XRD图谱及CASO的标准卡片。从图1(a)可以看出,所制备的样品XRD图谱出现的衍射角和衍射峰与标准卡片(PDF:89-1462)对应一致,说明掺杂的稀土离子在掺杂范围内不会改变其晶体结构,也不会产生其它杂相。图1(b)为基质CASO的晶体结构,该晶体中存在3种阳离子格位: Ca^{2+} , Al^{3+} , Si^{4+} , 其中 Ca^{2+} 与氧形成六配位的 $\text{Ca}^{2+}(\text{I})$ 格位和七配位的 $\text{Ca}^{2+}(\text{II})$ 格位,而 Al^{3+} 和 Si^{4+} 均与氧形成四配位的 SiO_4 和

AlO₄四面体结构。当配位数为6时, $r(\text{Ca}^{2+})=0.1000\text{ nm}$, $r(\text{Ce}^{3+})=0.1010\text{ nm}$, $r(\text{Tb}^{3+})=0.0923\text{ nm}$, $r(\text{Yb}^{3+})=0.0868\text{ nm}$;当配位数为7时, $r(\text{Ca}^{2+})=0.1060\text{ nm}$, $r(\text{Ce}^{3+})=0.1070\text{ nm}$, $r(\text{Tb}^{3+})=0.0980\text{ nm}$, $r(\text{Yb}^{3+})=0.0925\text{ nm}$,相对于其它阳离子格位[当配位数为4时, $r(\text{Al}^{3+})=0.0390\text{ nm}$, $r(\text{Si}^{4+})=0.0260\text{ nm}$], Ca^{2+} 离子与掺杂离子 Ce^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Yb^{3+} 的半径比较接近,因此在掺杂过程中这3种稀土离子更倾向占据 Ca^{2+} 离子格位。由于三价阳离子占据二价阳离子格位需要一定机制来满足电荷平衡补偿,在该过程中可能存在的电荷补偿方程式为:



因此在还原气氛下,该荧光粉的目标化学式为 $\text{Ca}_{1-1.5(x+y+z)}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8:x\text{Ce}^{3+},y\text{Tb}^{3+},z\text{Yb}^{3+}$ 。

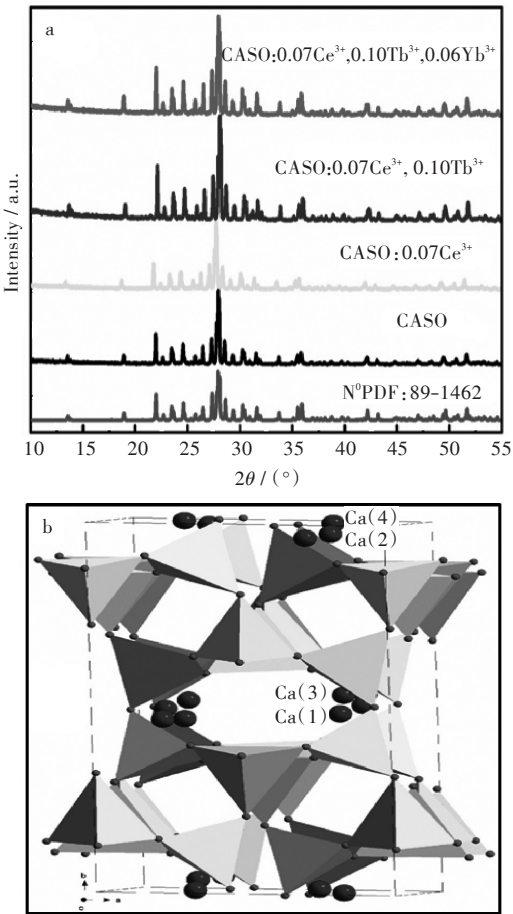


图1 (a)不同荧光粉样品的XRD图谱, (b)CASO的晶体结构

Fig. 1 (a)XRD patterns of different phosphor samples, (b)crystal structures of CASO

2.2 发光性能研究

图2(a)为单掺杂荧光粉样品CASO:0.07Ce³⁺的PLE谱和PL谱,由于Ce³⁺离子4f-5d电偶极允许跃迁,该荧光粉材料在250~330 nm近紫外光区域

具有较强的吸收,当被波长为315 nm的近紫外光激发后,其发射光谱呈现出不对称发射,这主要归因于Ce³⁺离子在掺杂过程中会占据2种不同的Ca²⁺离子格位。图2(b)和图2(c)分别为单掺杂荧光粉样品CASO:0.10Tb³⁺和CASO:0.06Yb³⁺的PLE谱和PL谱,由于4f-4f电偶极禁戒跃迁,相对于单掺杂荧光粉CASO:0.07Ce³⁺,这2种荧光粉样品在近紫外区域吸收强度很弱,因此在相应的激发光激发下,其发射光谱也表现出较低的发射强度[图2(b)和图2(c)放大倍数分别为10倍和60倍]。通过掺杂不同浓度的稀土离子,实验过程发现在单掺杂Ce³⁺、Tb³⁺和Yb³⁺时,其最佳掺杂摩尔浓度分别为7%,10%和6%,此时它们的发光强度最大。

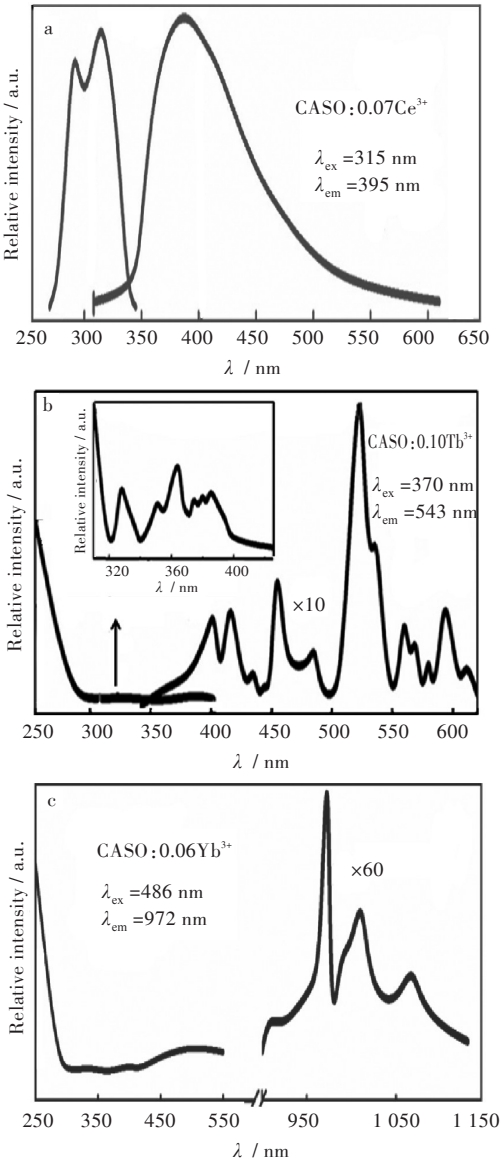


图2 单掺杂荧光粉的PLE谱和PL谱:

(a)CASO:0.07Ce³⁺, (b)CASO:0.10Tb³⁺, (c)CASO:0.06Yb³⁺

Fig. 2 PLE and PL spectra of single-doped phosphors: (a)CASO:0.07Ce³⁺, (b)CASO:0.10Tb³⁺, (c)CASO:0.06Yb³⁺

图 3(a) 为双掺杂荧光粉 $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}$, 0.03Yb^{3+} 和 $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}, 0.06\text{Yb}^{3+}$ 的 PLE 谱和 PL 光谱, 从图 3(a) 中可以看出, 在不同波长 $\lambda_{\text{em}} = 395 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{\text{em}} = 972 \text{ nm}$ 的监测下, 其 PLE 谱的形状十分接近, 说明在该双掺杂荧光粉中存在着 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量转移过程。从 PL 光谱可以看出, 随着 Yb^{3+} 离子掺杂浓度的增加, Ce^{3+} 离子的特征发射峰强度降低, 而 Yb^{3+} 离子的特征发射峰强度升高, 这进一步证明在该双掺杂荧光粉中存在着 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量转移过程。图 3(b) 为双掺杂荧光粉样品 $\text{CASO}:0.10\text{Tb}^{3+}$, 0.03Yb^{3+} 和 $\text{CASO}:0.10\text{Tb}^{3+}$, 0.06Yb^{3+} 的 PLE 谱和 PL 谱, 在该双掺杂荧光粉中存在着 $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量转移过程。从所测得的 PLE 谱可以看出, 在不同波长 $\lambda_{\text{em}} = 543 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{\text{em}} = 972 \text{ nm}$ 的监测下, 其 PLE 谱的形状也十分接近, 说

明在该双掺杂荧光粉中存在着 $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量转移过程。从 PL 谱可以看出, 随着 Yb^{3+} 离子掺杂浓度的增加, Tb^{3+} 离子的特征发射峰强度降低, 而 Yb^{3+} 离子的特征发射峰强度升高, 这进一步证明在该双掺杂荧光粉中存在着 $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量转移过程。并且从图 2(a) 和图 2(b) 中可以看出, 单掺杂荧光粉样品 $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}$ 的 PL 谱与 $\text{CASO}:0.10\text{Tb}^{3+}$ 的 PLE 谱存在重叠部分, 因此在 $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ 双掺杂荧光粉中存在着 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$ 的能量传递过程。基于以上分析, 由于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_6$ 跃迁能量为 Yb^{3+} 离子的 $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ 跃迁的 2 倍, 可以推测在三掺杂荧光粉 $\text{CASO}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 中存在着 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的逐级能量传递过程, 相对于双掺杂荧光粉, 该三掺杂荧光粉中 Yb^{3+} 的近红外发射强度进一步增强。

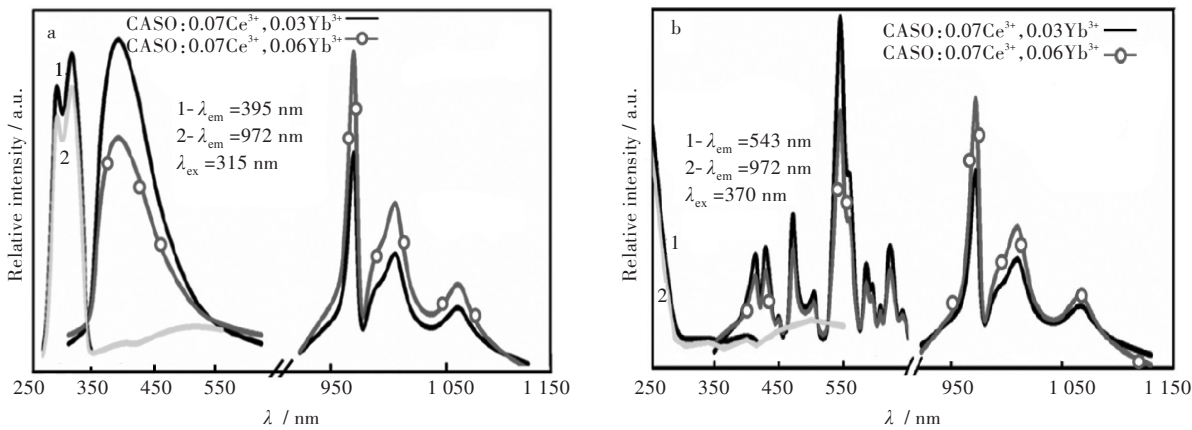


图 3 双掺杂荧光粉的 PLE 谱和 PL 谱:(a) $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}, z\text{Yb}^{3+}(z=0.03, 0.06)$, (b) $\text{CASO}:0.10\text{Tb}^{3+}, z\text{Yb}^{3+}(z=0.03, 0.06)$

Fig. 3 PLE and PL spectra of double-doped phosphors: (a) $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}, z\text{Yb}^{3+}(z=0.03, 0.06)$, (b) $\text{CASO}:0.10\text{Tb}^{3+}, z\text{Yb}^{3+}(z=0.03, 0.06)$

图 4(a) 为三掺杂荧光粉样品 $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}$, 0.10Tb^{3+} , 0.03Yb^{3+} 和 $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}$, 0.10Tb^{3+} , 0.06Yb^{3+} 的 PLE 谱和 PL 谱, 从图 4(a) 中可以看出, 该荧光粉的 PLE 谱由 250~350 nm 的宽吸收带组成, 最高峰位于 315 nm 处, 且在不同波长 $\lambda_{\text{em}} = 395 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{\text{em}} = 542 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{\text{em}} = 972 \text{ nm}$ 的监测下, 其 PLE 谱的形状与 Ce^{3+} 离子的 PLE 谱十分接近, 说明在该三掺杂荧光粉中存在着 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量转移过程。2 种荧光粉样品的 PL 谱由 Ce^{3+} 、 Tb^{3+} 和 Yb^{3+} 的特征发射峰组成, 并且随着 Yb^{3+} 离子掺杂浓度的增加, Ce^{3+} 和 Tb^{3+} 离子的特征发射峰强度降低, 而 Yb^{3+} 离子的近红外发射强度增强, 这进一步证明在该三掺杂荧光粉中存在着 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量

转移过程。该三掺杂荧光粉在 315 nm 的近紫外光激发下, 通过 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 逐级能量传递过程, 其能量传递效率更高, 并且存在着多种能量传递路径, 相对于双掺杂荧光粉样品, 使得 Yb^{3+} 的近红外发射强度进一步增强。图 4(b) 为荧光粉样品 $\text{CASO}:0.06\text{Yb}^{3+}$ 和 $\text{CASO}:0.07\text{Ce}^{3+}, 0.10\text{Tb}^{3+}, 0.06\text{Yb}^{3+}$ 的 NIR 发射光谱, 由于三掺杂荧光粉存在高效的能量传递过程, 使得该荧光粉 Yb^{3+} 离子的近红外发射强度相对于单掺杂荧光粉得到了明显的增强, 因此将该三掺杂荧光粉材料应用到硅基太阳能电池中, 可以有效地将吸收较弱的紫外光转换成吸收较强的近红外光, 实现硅基太阳能电池的最大光谱响应, 从而提升其光电转换效率。

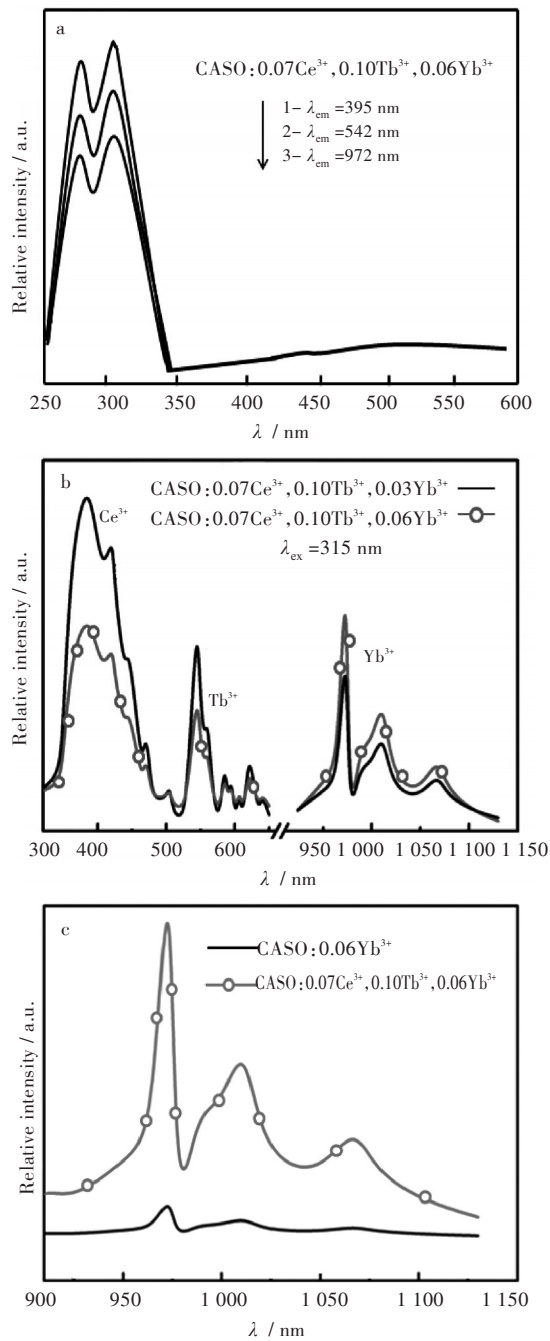


图4 CASO:0.07Ce³⁺, 0.10Tb³⁺, zYb³⁺(z=0.03, 0.06)的
(a)PLE谱和(b)PL谱,(c)CASO:0.06Yb³⁺和CASO:
0.07Ce³⁺, 0.10Tb³⁺, 0.06Yb³⁺的近红外光谱
Fig. 4 (a)PLE and (b)PL spectra of CASO:0.07Ce³⁺,
0.10Tb³⁺, zYb³⁺(z=0.03, 0.06), (c)NIR spectra of
CASO: 0.06Yb³⁺ and CASO: 0.07Ce³⁺, 0.10Tb³⁺, 0.06Yb³⁺

3 结 语

1)通过传统的高温固相法合成了下转换荧光粉材料CASO:Ce³⁺,Tb³⁺,Yb³⁺,稀土离子掺杂到该铝硅酸盐基质中,均占据Ca²⁺格位,并且掺杂少量的稀土离子不会改变该基质的晶体结构。
2)在该三掺杂荧光粉CASO:0.07Ce³⁺,0.10Tb³⁺,0.06Yb³⁺中,由于存在着Ce³⁺→Tb³⁺→Yb³⁺的高效能

量传递过程,相对于单掺杂荧光粉,Yb³⁺离子的近红外发射强度得到了明显的增强。
3)制备的最佳三掺杂荧光粉材料CASO:0.07Ce³⁺,0.10Tb³⁺,0.06Yb³⁺通过下转换作用,将315 nm的近紫外光转换成硅基太阳能电池吸收较强的近红外光,从而实现硅基太阳能电池的最大光谱响应,以提高其光电转换效率,该荧光粉材料在太阳能电池领域具有一定的应用前景。

参考文献

[1] RAI M, MISHRA K, RAI S B, et al. Tailoring UV-blue sensitization effect in enhancing near infrared emission in X, Yb³⁺: CaGa₂O₄ (X=0, Eu³⁺, Bi³⁺, Cr³⁺) phosphor for solar energy conversion [J]. Materials Research Bulletin, 2018, 105: 192–201.
[2] LI K, VAN D R. Enhancing the energy transfer from Mn⁴⁺ to Yb³⁺ via a Nd³⁺ bridge role in Ca₃La₂W₂O₁₂: Mn⁴⁺, Nd³⁺, Yb³⁺ phosphors for spectral conversion of c-Si solar cells [J]. Dyes and Pigments, 2019, 162: 990–997.
[3] SUN J Y, CUI D P, SUN G C, et al. Near-infrared luminescence and energy transfer in CaMoO₄: Ho³⁺, Yb³⁺ phosphor [J]. Journal of Materials Science, 2014, 49 (2): 527–531.
[4] DAI W B, LEI Y F, LI P, et al. Enhancement of photovoltaic performance of TiO₂-based dye-sensitized solar cells by doping Ca₃La_{3(1-x)}Eu_{3x}(BO₃)₅ [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(9): 4875–4883.
[5] DAI W B, XU S, ZHOU J, et al. Lead-free, stable and effective double FA₄Ge^{II}Sb^{III}Cl₂ perovskite for photovoltaic applications [J]. Solar Energy Materials and Solar cells, 2019, 192: 140–146.
[6] LIU P J, LIU J, ZHENG X, et al. An efficient light converter YAB: Cr³⁺, Yb³⁺/Nd³⁺ with broadband excitation and strong NIR emission for harvesting c-Si-based solar cells [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2 (29): 5769–5777.
[7] POCIASK M, MYNNAEV K D, KACZMARZYK M. Light trapping by chemically micro-textured glass for crystalline silicon solar cells [J]. Opto-Electronics Review, 2018, 26(4): 307–311.
[8] CHEN Y, WANG T L, ZHOU T Y, et al. Ce³⁺-doped silicate-based down-conversion phosphors: investigation on synthesis, structure and photoluminescence properties [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(7): 5573–5578.
[9] TAI Y P, LI X Z, DU X G, et al. Broadband near-infrared quantum cutting by Ce-Yb codoped YAG transparent glass ceramics for silicon solar cells [J]. RSC Advances, 2018, 8(41): 23268–23273.

- [10] SCHMIDT J, PEIBST R, BRENDDEL R. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: present and future [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 187: 39–54.
- [11] LIU T Z, CAI J, CUI Y, et al. Synthesis and near-infrared quantum cutting of Tb^{3+} , Yb^{3+} codoped $\text{GdBa}_3\text{B}_9\text{O}_{18}$ phosphors [J]. *Micro & Nano Letters*, 2018, 13 (1): 108–111.
- [12] 周佳, 戴武斌, 黄珂, 等. $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 发光性能及其在染料敏化太阳能电池中的应用[J]. *武汉工程大学学报*, 2018, 40(6): 632–636.
- [13] TANG Y F, WU C, SONG Y, et al. Synthesis and luminescence properties of Er-doped and Er/Yb-codoped CoAl_2O_4 pigments [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12909–12916.
- [14] YADAV R V, YADAV R S, SINGH A K, et al. Alkali ions effect on optical properties of Tm^{3+} , Yb^{3+} co-doped gadolinium tungstate phosphor [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 215: 277–284.
- [15] WANG L G, LI Y F, WANG Z, et al. Resonant energy transfer and near-infrared emission enhanced by tri-doped $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ phosphors for silicon solar cells [J]. *Journal of Luminescence*, 2018, 203: 121–126.
- [16] ZHAO J, GUO C F, LI T. Enhanced near-infrared emission by co-doping Ce^{3+} in $\text{Ba}_2\text{Y}(\text{BO}_3)_2\text{Cl}:\text{Tb}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ phosphor [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(36): 1318–1325.
- [17] 周佳, 戴武斌, 黄珂, 等. 碱土氯硅酸盐荧光粉的研究进展及展望[J]. *武汉工程大学学报*, 2019, 41(3): 242–247, 253.
- [18] DAI W B. Investigation of the luminescent properties of Ce^{3+} doped and $\text{Ce}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ co-doped $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ phosphors [J]. *RSC Advances*, 2014, 4 (22): 11206–11215.
- [19] DAI W B. A single-phased $\text{Sr}_{1-y-3x/2}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8:x\text{Ce}^{3+}, y\text{Mn}^{2+}$ with efficient energy transfer as a potential phosphor for white-light-emitting diodes [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, 87(8): 2531–2538.
- [20] DAI W B, ZHOU M, XIAN Z Y, et al. Structure and photoluminescence characteristics of europium (III) doped in $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ phosphors [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(49): 25470–25478.
- [21] DAI W B, ZHOU J, ZHANG Z H, et al. Photoluminescent properties of Eu-doped $\text{MAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ aluminosilicates phosphors [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 765: 650–658.

本文编辑: 苗 变